

刘如山,舒荣星,胡珍秀.变电站地震可恢复性研究[J].地震工程学报,2019,41(4):827-833.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.827

LIU Rushan, SHU Rongxing, HU Zhenxiu, Study on the Seismic Resilience of Substations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 827-833. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.827

变电站地震可恢复性研究

刘如山,舒荣星,胡珍秀

(中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 提出变电站地震可恢复性等级划分方法,设立评价变电站地震可恢复性的量化指标——可恢复性指数,给出基于建筑物和高压电气设备的权重系数与震害指数的变电站可恢复性指数计算公式,确定可恢复性指数与可恢复性等级对应关系,通过变电站实际震害与恢复样本研究建立变电站可恢复性矩阵。研究结果表明:随着可恢复性指数降低,变电站可恢复性越来越差,当可恢复性指数低于 0.45 时,变电站达到极难恢复的阈值;变电站所处的地震烈度越高时,变电站可恢复性就越低,恢复时间也越长。在 9 度区,变电站可恢复性指数开始快速降低,多数变电站为可恢复和难恢复,烈度为 10 度及以上地区,变电站极难恢复。

关键词: 变电站;地震;可恢复性等级;可恢复性指数;可恢复性矩阵

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0827-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.827

Study on the Seismic Resilience of Substations

LIU Rushan, SHU Rongxing, HU Zhenxiu

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: In this study, a grading method of the seismic resilience of substations is presented. The quantitative indicator “resilience index” is proposed to evaluate the seismic resilience of substations. A formula for computing the resilience index based on seismic intensity and the weighting coefficients of buildings and high-voltage electrical equipment is also proposed. The corresponding relationship between the resilience index and resilience grades is determined. The substation resilience matrix is also established through the study of actual seismic damage and recovery samples. The result shows that the seismic resilience of substation becomes weaker as the resilience index decreases. Once the index drops to less than 0.45, the substation would reach a threshold beyond recoverability. Generally, the higher the seismic intensity is, the weaker the substation resilience will be, and a longer restoration time will be needed. Most of the substations are conditionally restorable and hard to be restored in the area of 9-degree seismic intensity, and will be almost unrestorable in the area of 10-degree seismic intensity.

收稿日期: 2018-05-26

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2018A02); 国家重点研发计划项目课题(2018YFC1504602); 地震行业专项(201508023)

第一作者简介: 刘如山(1964—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事地震工程研究。E-mail: liurushan@sina.com。

通信作者: 舒荣星(1993—), 男, 硕士研究生, 从事电力设施抗震研究。E-mail: shurongxing@163.com。

Keywords: substation; earthquake; resilience grades; resilience index; resilience matrix

0 引言

变电站是构成电力系统的重要节点,其在地震作用下的破坏程度和震后变电功能恢复进度对灾区的应急救援、居民安置以及灾后重建工作有着至关重要的影响^[1]。国内外历次大地震中变电站均遭受大量破坏,且由于恢复所需投入资源多、恢复难度大使得恢复时间较长,给抗震救灾和恢复重建工作带来极大的不便。近年来随着经济和科技的发展,现代城市的建设对生命线系统的地震安全性以及可恢复能力提出了更高的要求。因此研究变电站的地震可恢复性、评估变电站地震后的恢复能力与恢复时间,能够为震后电力设施设备的资源配置决策、加速震后灾区的供电恢复和电力设施重建工作提供参考,从而有效地降低地震造成的直接和间接的经济损失。

可恢复性(Resilience)具有弹性、韧性的意思,最初由 Holling^[2]在20世纪70年代研究生态系统时提出,其将可恢复性定义为“系统受干扰或吸收变化而短暂波动后仍保持稳定性和持续性的一种特性或能力”。此后 Timmerman^[3]将可恢复性的概念运用到社会系统中去,定义其为系统或系统的一部分遭受灾害并从中恢复的能力。Brenuan等^[4-5]提出具有可恢复功能的城市抗震减灾概念,希望降低灾害发生概率、减少损失和缩短恢复时间。Thornley等^[6]通过对 Canterbury 地震灾害的分析,探讨了可恢复性的概念,并提出如何建立在地震中具有可恢复性的社区。David Elms^[7]对如何提高社区应对自然灾害的可恢复性进行了研究,指出可恢复性的影响因素有两点:一是外界对系统造成的扰动程度,二是系统从扰动中恢复的能力。郭小东等^[8]提出建设防灾韧性城市的理念,并探讨韧性城市的内涵,给出了评估城市防灾韧性能力的定量方法。祁淳^[9]对建筑的可恢复性从结构和非结构两部分进行了分析,根据不同构件的破坏程度对建筑的地震可恢复性划分成5个等级。尽管近年来国内外学者从不同的角度尝试对可恢复性进行理解和阐释,但专门研究电力系统或变电站地震可恢复性的文献则很少,诸多学者多从震害损失评估、易损性分析、破坏模式和功能失效模式、震后恢复时间等方面进行研究。Cagnan等^[10]建立了电力系统的震后恢复模型,由此得到其恢复的骨架曲线,再应用离散事件仿真模型对北岭地震后洛杉矶地区电力恢复情况进行模拟。刘如山等^[11]对不同烈度区内变电站的变压器及其他高压电气设备的破坏频次、变电

站停运状况及功能恢复时间进行了统计分析。王丽华等^[12]分析了设备类型及安置方式对电力系统震害破坏程度的影响,整理了电力系统震后恢复工作的模式类型、基本原则、工作顺序等内容。于文等^[13]根据电力系统在近些年地震中的破坏情况,总结其受灾特点,分析各类电力设施的震害原因及破坏机制,并在此基础上,从工程措施和非工程措施两方面提出电力系统抗震防灾对策。

目前,生态环境、社区建设、应急管理、城市供水系统等诸多领域均引入了可恢复性这一概念,尤其是近年来“韧性城市”越来越受到科研工作者的关注,而对于电力系统及构成的输变电设施地震可恢复性进行深入研究的结果并不多,对于如何评价变电站在地震时的恢复能力尚未形成一套科学具体的方法。鉴于此,本文首先对变电站地震可恢复性进行了诠释,然后提出了用以量化评价变电站地震可恢复性的指数及其计算方法,并通过变电站实际震害与恢复样本统计出其在不同地震烈度下的各级可恢复性等级的发生概率,即可恢复性矩阵,为震后依据烈度快速评估受灾地区变电站的可恢复能力以及恢复所需资源配置提供参考。

1 变电站地震可恢复性

尽管国内外对可恢复性存在不同的理解和阐释,但都强调是系统具有的“承受或吸收扰动并从中恢复”的能力。将变电站地震可恢复性定义为变电站具有的一种属性,则该属性表示其遭遇地震导致元件破坏、供电功能状态下降时,通过资源投入,在一定时间内能基本恢复到震前常态化状态并持续稳定(图1)。变电站地震可恢复性有以下特点:(1)变电站不同于自然环境和生态系统,遭受扰动破坏时自身系统内部无法调节恢复,需要依靠电力行业的力量方能恢复;(2)恢复指的是变电站能够持续稳定的常态化正常运行,而地震时部分变电站仅为通过替代性设备临时恢复使其能够临时供电,一些电气设备和建构筑物土建设施尚需进一步检修或维修复原,不是真正意义的完全恢复;(3)恢复是一个过程,从遭受地震灾害到人力、物力资源的投入,变电站的状态水平会逐步提高,其可恢复性也在不断变化。可恢复性研究主要用于震后快速评估灾区变电站的可恢复性程度,包括恢复时间、恢复所需资源等,同时划定出不可恢复的界限,判断何种破坏程度的变电站需要重建。

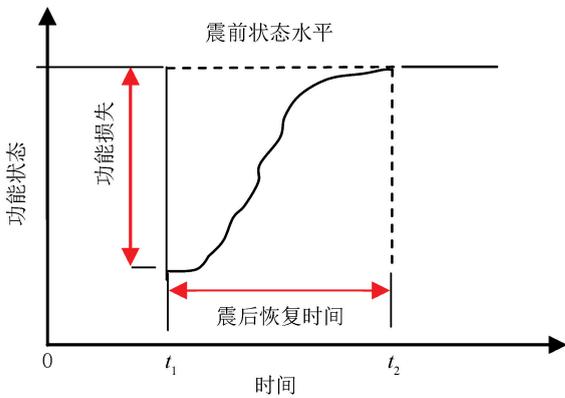


图 1 变电站地震可恢复性示意图

Fig.1 Seismic resilience schematic diagram of substations

变电站地震可恢复性分为功能可恢复性和物理可恢复性。功能可恢复性是指恢复供电量和供电用户范围,其不需要所有设备或建筑物完好。物理可恢复性是指变电站所属建筑物得到修整或重建、电气设备得到修复或更换,从而在功能和物理两个状态上达到震前的常态化水平。本文所述变电站的可恢复性

指的是以物理可恢复性为基础,以建筑物及高压电气设备的震害表现(图 1 中状态下降程度)为研究对象。

2 变电站可恢复性等级划分

在可恢复性等级划分方面,祁淳^[9]对教学建筑的可恢复性等级划分为 5 个等级:完好、易恢复、可恢复、难恢复、不可恢复。实际上,等级划分的级数及各等级的定义是由人们的目的、认识、实际需求以及可操作性相关。在地震破坏等级划分方面,我国建筑物地震破坏等级划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏 5 个等级;生命线工程地震破坏亦划分为 5 个等级^[14]。为使变电站与建筑结构在可恢复性等级方面的划分相一致,本文亦将变电站的地震可恢复性分为 5 个等级:基本完好、易恢复、可恢复、难恢复、极难恢复。根据我国汶川地震以来几个地震的变电站现场实际破坏情况和恢复情况,将变电站 5 个可恢复性等级对应的震害、停电模式、恢复时间列于表 1。

表 1 变电站可恢复性等级

Table 1 Resilience grades of substations

可恢复性等级	地震破坏状态、功能失效模式与恢复时间
基本完好	变压器完好,且极个别其他高压电气设备破坏,建筑物基本完好。变电站未停电或发生停电原因为上游停电,偶有主变跳闸误动作或因设备损坏停电。几小时内即可修复。
易恢复	变压器薄弱部位有损坏,其他高压电气设备少量破坏,建筑物基本完好或轻微破坏。变电站停电,在 0.5~2 d 以内可修复。
可恢复	变压器破坏,基础移位或倾斜,一些其他高压电气设备破坏(破坏率低于 30%),建筑物轻微破坏或中等破坏。变电站停电,2~5 d 可修复。
难恢复	变压器本体破坏较严重,伴有基础出现裂纹和倾斜移位,许多其他高压电气设备破坏(破坏率低于 60%),建筑物严重破坏。变电站停电,修复需 7~15 d。
极难恢复	变压器多处受损,其他高压电气设备破坏率超过 60%,建筑物严重破坏或毁坏。变电站停电时间长,修复 ≥ 15 d。

3 变电站可恢复性指数

3.1 可恢复性指数与计算式

进行可恢复性的定量分析和判断时,需要寻找能够标志可恢复性的量化指标。影响变电站震后功能恢复时间的主要因素有变电站震害程度(建筑物破坏程度、电气设备破坏率)、变电站的重要程度、恢复工作中人力资源的充足性、物力资源(备件和辅助设施)的可用性。由于变电站的重要性程度、恢复所需资源条件、备件和辅助设施具有一定随机性,难以控制,这里假定此三个因素均是相同的,则变电站地震可恢复性只与变电站震害程度相关,其可恢复性可由地震破坏指标来表达。

变电站主要由变压器、断路器、隔离开关、避雷器、CT、PT 等室外高压电气设备和主控室等房屋建筑及其室内监控设备组成。由于变电站的室内设备

破坏程度一般与建筑物的破坏密切相关,因此将室内设备划入建筑物,其破坏等同于建筑物破坏程度;变压器是整个变电站中的关键设备,其价值占比很大,研究结果也表明,变压器瓷套管底部最易破坏,与其他高压电气设备易损性有明显区别^[15-16],因此,可以将室外高压电气设备分为变压器和其他高压电气设备 2 类。由此,将变电站设施分为房屋建筑(含室内设备,以下同)、变压器、其他高压设备这 3 类,定义变电站可恢复性指数由这 3 类设施的权重及震害程度表达,即

$$I_r = \sum_{i=1}^3 \omega_i \times (1 - D_i) \quad (1)$$

式中: I_r 为变电站可恢复性指数; i 为变电站设施分类; $i = 1, 2, 3$ 分别代表变电站的房屋建筑、变压器、其他高压电气设备; ω_i 为各类设施的权重系数; D_i 为房屋建筑震害指数,或变压器、其他高压电气

设备破坏比。变压器和其他高压电气设备破坏比也可看做是设备的“震害指数”。

综合考虑变电站中各类设施造价占比^[17]、恢复难度及重要程度,变电站房屋建筑、变压器、其他高压电气设备的权重系数可以分别设为0.4、0.3、0.3。震害指数是评定房屋建筑震害程度的指标^[18],变电站房屋建筑的震害指数的取法可参照国家标准《地震现场工作 第4部分:灾害直接经济损失》对钢筋混凝土和砌体房屋损失比的规定^[19]。考虑到其他高压电气设备破坏形式主要是瓷构件产生裂纹或瓷柱直接截断,一旦破坏便无法修复,因此其破坏比即为变电站内破坏数量与总数的比值。变压器破坏往往是瓷套管、油枕、风扇等局部破坏,本体极不容易破坏,一般遭受地震破坏后仍具有修复使用的价值,因此其遭受破坏时的破坏比可设为0.2,以便更准确地表征变压器的真实破坏情况。

3.2 可恢复性指数与可恢复性等级的关系

变电站可恢复性指数根据破坏情况由式(1)计算出,而评价变电站的可恢复性等级需要建立可恢复性指数与可恢复性等级实质的对应关系。计算绵阳、德阳、广元、成都(部分地区)的102个电压等级在110~330 kV的变电站在汶川地震后的可恢复性指数值,并将其划分为若干个间隔为0.025~0.15的小区间,统计分析各个可恢复性指数区间内变电站电气设备和房屋结构的破坏程度、变电站恢复时间,其结果如表2所示,可恢复性指数与恢复时间的关系如图2所列。图2中蓝线是拟合曲线,红色虚线是由于有6座重建变电站并未给出具体的恢复时间,拟合曲线中并未体现,因此在拟合曲线上适当延伸所得。图中恢复界限是变电站能否及时恢复的

分界线,恢复界限右侧的数据点表示变电站可以恢复,恢复界限左侧的数据点表示变电站极难恢复、或需重建。

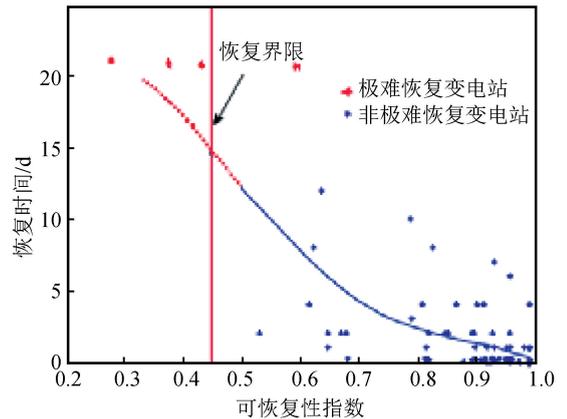


图2 可恢复性指数与恢复时间的关系

Fig.2 Relationship between resilience index and restoration time

根据表2与图2可以看出:(1)总体趋势上看,随着变电站的震害越来越重,平均恢复时间越来越长,可恢复性指数值也越来越小。(2)当 I_r 在(0.975,1.000]区间时,变电站内高压电气设备和建筑物基本完好,且变电站几乎未停电,恢复时间约在几小时之内,故可设为极易恢复的界限;当 I_r 属于(0.900,0.975]区间时,少数变压器破坏,少数其他高压电气设备破坏,建筑物基本完好或轻微破坏,恢复时间在1 d左右,变电站很容易恢复;当 I_r 属于(0.650,0.900]的几个小考察区间内,对变电站的破坏程度和恢复时间进行统计,则发现这些变电站内变压器均有不同程度破坏,其他高压电气设备亦有破坏,变电站平均恢复时间在1~3 d左右,变电

表2 变电站破坏程度与可恢复性指数统计

Table 2 Statistics of substations damage and resilience index

可恢复性指数	变电站破坏程度基本情况	平均恢复时间/d	样本数
(0.97,1.00]	变压器几乎完好,其他高压电气设备近乎完好,建筑物基本完好,绝大部分变电站未停电	0.31	27
(0.95,0.97]	少部分变压器破坏,其他高压电气设备几乎无破坏,大部分建筑物基本完好,个别建筑物轻微破坏,约有一半变电站未停电	0.61	22
(0.90,0.95]	大部分变压器均有不同程度破坏,其他高压电气设备较少破坏,大部分建筑物基本完好,个别轻微,部分变电站未停电	1.11	19
(0.85,0.90]	大部分变压器均有不同程度破坏,其他高压电气设备较少破坏,建筑物轻微破坏,个别建筑物基本完好	1.34	7
(0.80,0.85]	大部分变压器均有不同程度破坏,其他高压电气设备较少破坏,部分建筑物轻微破坏、部分中等破坏	1.98	10
(0.65,0.80]	绝大部分变压器有破坏,其他高压电气设备较多破坏,部分建筑物中等破坏、个别严重破坏	3.44	5
(0.45,0.65]	变压器有破坏,其他高压电气设备较多破坏,但建筑物严重破坏甚至毁坏	7.00	7
(0.00,0.45]	变压器破坏,其他高压电气设备绝大部分破坏,建筑物毁坏严重,需重建	>15	5

站可恢复;当 I_r 属于 $(0.450, 0.650]$ 区间时,变电站内高压电气设备破坏率明显增加,建筑物破坏也更为严重,变电站平均恢复时间在 7 d 左右,最长者达到 13 d。当 I_r 低于 0.45 时,所有变电站因为极难恢复,基本都采取了恢复重建措施。因受灾严重需重建的变电站有共 6 座,其可恢复性指数如表 3 所列。其中穿心店变电站尽管房屋和设备本身破坏程度不是很突出,但因其建在山梁上,房屋基础塌陷严重,震后被列为了异地重建变电站。其他重建变电站中可恢复性指数最大的是茂县变电站,可恢复性指数值为 0.43。结合表 2 与图 2 综合来看,可以将变电站极难恢复这一等级的可恢复性指数阈值定位为 0.45。

表 3 需重建变电站可恢复性指数

Table 3 Resilience indexes for substations need to be rebuilt

变电站名称	烈度	可恢复性指数
穿心店	9	0.59
辕门坝	9	0.28
安县	9	0.28
茂县	9	0.43
晓坝	10	0.28
汉旺	10	0.37

综合以上分析,与变电站基本完好、易恢复、可恢复、难恢复、极难恢复 5 个等级对应的可恢复性指数划分区间界限值可分别设为:0.97、0.90、0.65、0.45,不同可恢复性等级与指数区间的对应关系列于表 4。

表 4 变电站可恢复性指数与可恢复性等级的对应关系

Table 4 Corresponding relationship between resilience index and resilience grade of substations

可恢复性等级	可恢复性指数
基本完好	$(0.97, 1.00]$
易恢复	$(0.90, 0.97]$
可恢复	$(0.65, 0.90]$
难恢复	$(0.45, 0.65]$
极难恢复	$[0.00, 0.45]$

由于房屋震害指数在 0.7 以上就达到严重破坏和毁坏阶段,通常情况需要考虑恢复重建,而本文算例中变压器破坏比最大取 0.2 以下,达不到 1.0,因此即使变电站破坏相当严重需要重建,根据本文提出的算法,通常情况下变电站可恢复性指数基本达不到下限值 0.0。另外,可恢复性等级与可恢复性指数值在数学上并不是近似的线性对应关系。

3.3 三类设施的破坏对可恢复性的表征性分析

恢复时间在一定程度上能直观地反映变电站的恢复能力,一般所需恢复时间越短,可恢复性就越

强。为便于震后依据现场震害调查资料,快速评估单体变电站的恢复时间所需长短,对变电站恢复时间的表征因素进行研究,分析建筑物、变压器、其他高压电气设备的震害表现看哪个因素更能反映震后恢复时间,更适用于评估恢复时间长短。此处我们研究变电站恢复时间随三者震害表现的变化情况,即变压器、其他高压电气设备破坏率或是建筑物的损失比对恢复时间的表征能力。

考虑到变电站样本个体之间的差异性 & 少数变电站恢复时间的特殊性,在此采用平均恢复时间这一指标对变电站数据进行整理并进行函数拟合(图 3)。图 3 中横坐标震害指数是对建筑物而言的,对于变压器和其他高压电气设备而言则是其破坏率。

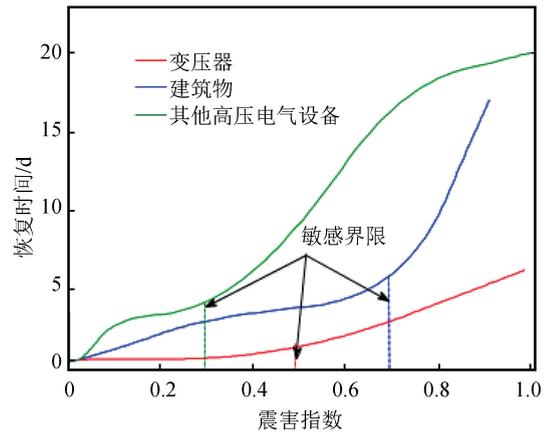


图 3 变电站各类设施破坏对恢复时间的表征性

Fig.3 The characterization of damage on various equipment to restoration time

由图 3 可知,当震害指数较高时,平均恢复时间按其他高压电气设备、建筑物、变压器顺序依次递减,说明其他高压电气设备最能表征恢复时间,建筑物次之,变压器最弱,即当其他高压电气设备破坏程度达到很高时,可认为变电站恢复时间往往很长,而当变压器破坏程度达到很高时,变电站恢复时间可能很长,但也可能很短,这为我们在地震现场依据其他高压电气设备震害表现快速评估其恢复时间提供了依据;破坏程度较低时,随三者破坏程度的加深,变电站恢复时间呈现逐步增加趋势,当到达一定程度时,变电站恢复时间急剧增加,但三者的恢复时间敏感界限不同,其他高压电气设备最快到达敏感界限,建筑物最晚达到敏感界限,即在破坏程度较低区域,平均恢复时间就随着其他高压电气设备的破坏程度加深而急剧增大,此时恢复时间随变压器破坏程度加深仍平稳增大直至到达变压器的敏感界限才开始急剧增大,而只有当建筑物破坏程度达到严重

破坏或完全毁坏时,变电站恢复时间才急剧增大。

4 变电站可恢复性与地震烈度的关系

4.1 可恢复性指数与恢复时间、地震烈度的关系

汶川地震震中烈度达到 11 度,在低、中、高不同烈度区均含有较丰富的变电站样本。利用这些样本统计变电站可恢复性指数、恢复时间与烈度之间三者关系三维散点针状图(图 4)。变电站所处烈度与可恢复性指数之间的关系如图 5 所示。由图 4、图 5 可以看出,可恢复性指数较高、恢复时间较短的点都集中在烈度较低区域(坐标系左上角区域);而可恢复性指数较低、恢复时间较长的点都集中在烈度较高区域(坐标系右下角区域),且可恢复性指数和恢复时间基本随着烈度的增大而逐渐减小;当烈度从 8 度到 9 度时,变电站可恢复性指数下降较快,从 0.88 骤降至 0.54,这是由于在 9 度区变电站破坏程度明显加重所导致。

4.2 变电站可恢复性矩阵

计算受汶川地震影响的 102 座变电站的可恢复性指数,根据表 4 确定出各变电站可恢复性等级,结合各变电站位置的烈度,统计了烈度 6~10 度的变电站在各可恢复性等级下的占比,从而建立了变电站可恢复性矩阵(表 5)。根据表 5 可以快速推断地震发生后在某一地震烈度地区变电站最可能的可恢复性状态,以及出现不同可恢复性状态的概率。由表 5 可以看出,当烈度为 6 度时,变电站基本完好,可能个别变电站轻微破坏但不会导致断电;烈度为 7 度时,破坏的变电站很容易恢复,变电站以基本完好和轻微破坏为主,少部分变电站产生一定破坏;当烈度为 8 度时,变电站多为易恢复和可恢复,个别有难恢复的可能;在 9 度区,多数为可恢复和难恢复,部分已达到极难恢复;烈度为 10 度及以上地区,变电站的破坏几乎都达到极难恢复的程度。

表 5 变电站地震可恢复性矩阵(%)

Table 5 Seismic resilience matrix of substations(%)

烈度	可恢复性等级				
	基本完好	易恢复	可恢复	难恢复	极难恢复
6	100	0	0	0	0
7	40.0	43.6	16.4	0	0
8	9.1	48.5	30.3	12.1	0
9	0	0	33.3	33.3	33.3
10	0	0	0	0	100

应当指出,本统计是针对汶川地震而言的,该地区当时 110 kV 变电站绝大多数是未设防和 7 度设防的变电站,主控室基本都是砖混结构房屋,且是普通型的室外瓷柱型高压电气设备,抗震能力较弱。近十年来,很多新建的变电站都采用了钢筋混凝土房屋,而且出现了大量新型的 GIS 变电站,这些变电站大大提高了抗震能力。本文统计的变电站可恢复性矩阵并不适用于这些新建的抗震能力很高的钢混结构变电站和 GIS 变电站。

5 结语

国内外破坏性地震表明,变电站作为电网的重要节点容易遭受大量破坏,造成巨大的经济损失且严重阻碍灾区重建工作的进行,因此深入研究变电站的地震可恢复性和震后恢复效率很有必要。本文提出了量化变电站地震可恢复性的指标——可恢复性指数,确立了其基于震害表现的计算方法,分析了房屋、变压器以及其他高压电气设备对变电站恢复时间的影响作用,统计了变电站烈度、可恢复性指数、恢复时间三者关系,建立了变电站地震可恢复性

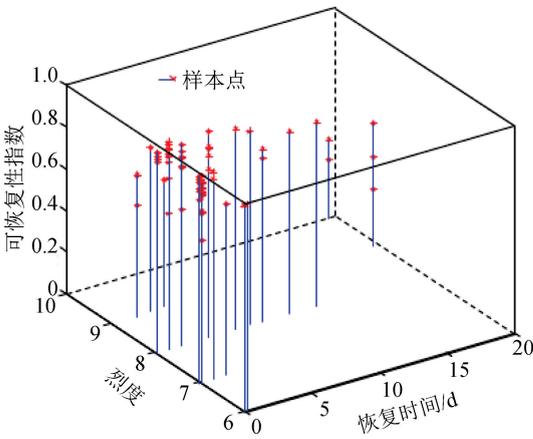


图 4 恢复时间、可恢复性指数、烈度的关系

Fig.4 Relationship among restoration time, resilience index and intensity

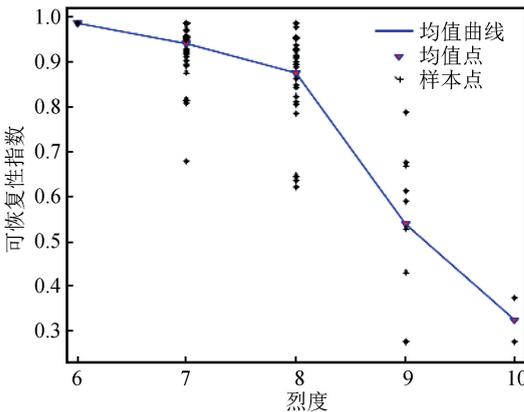


图 5 可恢复性指数与烈度的关系

Fig.5 Relationship between resilience index and intensity

矩阵。为变电站的震后可恢复性快速评估、电力系统应急工作指挥与部署、电力设施救灾物资的分配提供科学参考。

变电站的供电恢复是一项复杂的工作,其不仅取决于变电站本身的建筑及设备完好程度,同时也与电网中上游部分功能程度有关,且地震发生时,部分变电站仅仅是恢复供电,设备和建筑物有时并未完全修复。另外,决定和影响变电站可恢复性的因素复杂多样,目前高烈度震害样本积累还不多,今后尚应随着震例的积累,收集更多的变电站震害资料,对变电站的可恢复性指数、可恢复性矩阵进行进一步检验和修正完善。

参考文献(References)

- [1] 侯宏生,赵猛,刘怡,等.地震区域的电力自动调度应急模型设计[J].地震工程学报,2018,40(3):597-603.
HOU Hongsheng, ZHAO Meng, LIU Yi, et al. Emergency Model Design for Automatic Dispatching of Electric Power in Seismic Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 597-603.
- [2] HOLLING S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [3] Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications [M]. Toronto, Canada: Institute for Environment Studies, University of Toronto, 1981.
- [4] BRUNEAU M, REINHORN A. Seismic Resilience of Communities-conceptualization and Operationalization [C]//Proceedings of Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes. Bled, 2004; No. 12.
- [5] BRUNEAU M. Enhancing the Resilience of Communities Against Extreme Events from an Earthquake Engineering Perspective[J]. Journal of Security Education, 2006, 1(4): 159-167. DOI: 10.1300/j460v01n04_14.
- [6] THORNLEY L, BALL J, SIGNAL L. Building Community Resilience: Learning from the Canterbury Earthquakes [R]. Final Report to Health Research Council and Canterbury Medical Research Foundation, 2013.
- [7] ELMS D. Improving Community Resilience to Natural Events [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2015, 32(1-2): 77-89.
- [8] 郭小东,苏经宇,王志涛.韧性理论视角下的城市安全减灾[J].上海城市规划,2016,26(01):41-44.
GUO Xiaodong, SU Jingyu, WANG Zhitao. Urban Safety and Disaster Prevention under the Perspective of Resilience Theory [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016, 26(01): 41-44.
- [9] 祁淳.教学建筑地震可恢复性评价方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.
QI Chun. Research on the Evaluation Method of Earthquake Resilience of Teaching Building [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [10] ÇAGNAN Z, DAVIDSON R A, GUIKEMA. Post-earthquake Restoration Planning for Los Angeles Electric Power [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(3): 589-608.
- [11] 刘如山,张美晶,邹玉斌.汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(增刊1):200-211.
LIU Rushan, ZHANG Meijing, WU Yubin. Damage and Failure Study of Sichuan Electric Power Grid in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18 (Suppl): 200-211.
- [12] 王丽华,王志涛,郭小东.电力系统地震灾害及防救规划对策[J].山西建筑,2017,43(4):45-46.
WANG Lihua, WANG Zhitao, GUO Xiaodong. The Power System Earthquake Disaster and Prevention Planning Countermeasures [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(4): 45-46.
- [13] 于文,葛学礼,朱立新.电力系统震害分析和抗震防灾对策[J].工业建筑,2016,46(6):12-15
YU Wen, GEXUELI, ZHU Lixin. Seismic Disaster Analysis and Disaster Prevention Countermeasures of Electric Power System [J]. Industrial Construction, 2016, 46(6): 12-15.
- [14] 生命线工程地震破坏等级划分:GB/T 24336-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
Classification of Earthquake Damage to Lifeline Engineering: GB/T 24336-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [15] 熊明攀.基于不同地震动参数的变电站高压电气设备易损性研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.
XIONG Mingpan. Research on the Vulnerability of High Voltage Electrical Equipment Based on Different Ground Motion Parameters [D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [16] 陈传新,刘彦辉,贺瑞,等.考虑液-固耦合的大型超高压换流变压器地震响应研究[J].地震工程学报,2017,39(3):397-403.
CHEN Chuanxin, LIU Yanhui, HE Rui, et al. Study on the Seismic Response Study of a Converter Transformer Considering Oil-soild Interaction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 397-403.
- [17] 张中近,刘如山,姜立新.基于损失统计的变电站地震经济损失评估方法[J].自然灾害学报,2016,25(4):93-100.
ZHANG Zhongjin, LIU Rushan, JIANG Lixin. Assessment Method of Seismic Economic Loss in Substation Based on Loss Stastes [J]. Journal of Natural Disaster, 2016, 25(4): 93-100.
- [18] 薄景山,张建毅,孙平善,等.震害指数及有关问题的讨论[J].自然灾害学报,2012,21(6):37-42.
BO Jingshan, ZHANG Jianyi, SUN Pingshan, et al. Discussion on Seismic Damage Index and Relevant Problems [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6): 37-42.
- [19] 地震现场工作第 4 部分:灾害直接损失评估:GB/T 18208.4-2011[S].北京:地震出版社,2011.
Post-earthquake field works-Part 4: Assessment of direct loss: GB/T 18208.4-2011 [S]. Beijing: Seismological Press, 2011.